



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MECHANICAL ENGINEERING

REKUPERACE ENERGIE U HPV

RENEWAL ENERGY IN HPV

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. IVO BITTNER

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Ing. ZDENEK KAPLAN, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Ivo Bittner

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem c.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Rekuperace energie u HPV

v anglickém jazyce:

Renewal energy in HPV

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Obsahem práce je komplexní studium silničních vozidel poháněných lidskou silou s cílem rekuperovat energii mařenou při brzdění vozidla.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce magisterského studia je ideový návrh rekuperace energie mařené při brzdění silničního vozidla poháněného lidskou silou.

Seznam odborné literatury:

Allan V. Abbott, David Gordon Wilson: Human Powered Vehicles

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Zdenek Kaplan, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.

Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.

Děkan fakulty



ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá komplexním studiem a návrhem rekuperační soustavy silničního vozidla poháněného lidskou silou. Obsahuje přehled různých typů rekuperačních prostředků, jejich vlastnosti, výhody, nevýhody a použitelnost při konstrukci takového vozidla.

KLÍČOVÁ SLOVA

HPV, rekuperace, jízdní kolo, kondiční cvičení, elektrokolo, baterie, superkapacitor

ABSTRACT

This thesis deals with comprehensive study and design of recovery system of a road vehicle powered by human power. It contains an overview of different types of heat recovery devices, their characteristics, advantages, disadvantages and applicability in the construction of such a vehicle.

KEYWORDS

HPV, recuperation, bicycle, fitness, electric bike, battery, supercapacitor



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BITTNER, I. Rekuperace energie u HPV. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 48 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeňek Kaplan CSc.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Kaplana, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2011

.....

Ivo Bittner



PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Zdeňku Kaplanovi, CSc. za cenné rady a podporu při řešení dané problematiky.

Zároveň chci poděkovat své matce za podporu a bezmeznou trpělivost při mém studiu.

OBSAH

Úvod.....	9
1 Historický vývoj jízdního kola.....	10
1.1 Vznik a využití kola.....	10
1.2 Vývoj jízdního kola	11
1.3 Současné trendy.....	14
1.3.1 Sportovní silniční kola	15
1.3.2 Horská kola	15
1.3.3 Trekingová kola.....	16
1.3.4 Speciální kola	16
1.3.5 Elektrokola	18
2 Stavba silnic a cyklostezek	19
2.1 Silnice.....	19
2.2 Cyklostezky	19
3 Rekuperace energie	22
3.1 Výkonnost lidského organismu	22
3.2 Akumulace energie	23
3.2.1 gumový svazek	23
3.2.2 setrvačnickové akumulátory	24
3.2.3 Tlaková nádoba	25
3.3 Elektrická energie	25
3.3.1 Baterie	25
3.3.2 Superkapacitory	25
4 Návrh rekuperační soustavy	26
4.1 Elektronická soustava	26
4.1.1 Elektromotor.....	26
4.1.2 Superkapacitor.....	27
4.1.3 Nabíjení superkapacitoru	29
4.1.4 Simulace nabíjení reálného superkapacitoru.....	30
4.1.5 Schéma zapojení	34
5 Simulace jízdního manévru	36
5.1 Model jízdního manévru	36
5.1.1 Numerický výpočet.....	38
6 Vizualizace možného řešení	39
Závěr	42
Seznam použitých zkratek a symbolů	46

ÚVOD

Rekuperací energie se v dnešní době zabývají snad všechna odvětví moderní dopravy. V některých je vývoj na již poměrně slušné úrovni, jinde ještě v plenkách. A takovým případem je právě skupina vozidel poháněných lidskou silou. Vzhledem k slabému zdroji, který oproti jiným představuje lidský organismus, je výzvou pokusit se takový systém navrhnout tak, aby bezzbytku fungoval. HPV vozidla by se dala rozdělit do tří hlavních skupin, kterými jsou vozidla pohybující se po souši, vodě a ve vzduchu. Vzhledem k nejrozšířenější skupině vozidel pohybujících se pomocí lidské síly po souši, se ve své práci zaměřím právě na tato, především pak na jízdní kola.

Stejně jako u jiných dopravních prostředků, které nejsou vybaveny systémem rekuperace energie - automobily, vlakové soupravy, autobusy, trolejbusy atd. – i u jízdních kol dochází při brzdění ke zbytečnému maření dříve nabyté kinetické energie, kterážto se přemění v brzdné soustavě v teplo. Toto pak již bez dalšího užitku unikne do okolí. Ale v případě vozidel poháněných cizím zdrojem je člověk pouze pasažér a svou energii více méně nijak aktivně nezapojuje. Oproti tomu právě pohyb na jízdním kole je nejen ekologickou formou dopravy, ale taktéž poskytuje pro člověka jistý typ kondičního cvičení. Avšak právě u kondičního cvičení je dbáno na jistou konstantnost zatížení, která se v průběhu cvičení buď nemění vůbec, nebo dle požadovaných parametrů, čehož u jízdního kola v běžných podmínkách nelze dosáhnout, pouze v jakýchsi laboratorních, v tělocvičně. Zde se však na druhou stranu člověk okrádá o zážitek a požitek z jízdy volnou přírodou. Problémem při jízdě v přírodě je situace, kdy cyklista při své jízdě překonává převýšení, jehož důsledkem zvýší svou tělesnou teplotu, dochází k pocení a při následné jízdě z kopce naopak nevyvíjí žádnou námahu a ještě k tomu je chlazen proudícím vzduchem, což může vést ke zdravotním komplikacím, zvláště pak jedná-li se o staršího, nebo nemocného člověka. Proto se ve své práci pokusím zpracovat systém vozidla, kdy cyklista pojedje s konstantním zatížením a systém rekuperace bude energii při jízdě z kopce ukládat, aby pak v případě jízdy do kopce touto energií cyklistovi vypomohl a. V tomto řešení vidím vhodnou kombinaci již zmíněného kondičního cvičení s cykloturistikou.

1 HISTORICKÝ VÝVOJ JÍZDNÍHO KOLA

Tato kapitola se zabývá shrnutím současných poznatků z oblasti vývoje kol a bicyklů, jakož i historií pozemní dopravy.

1.1 VZNIK A VYUŽITÍ KOLA

O kole jako takovém se dozvídáme z historických pramenů již z dob Sumerské civilizace okolo roku 4000 před naším letopočtem. Existují však i indicie z Dánska a Holandska, že kolo bylo užíváno už o 1500 let dříve. Ať už kolo vynalezl kdokoliv, jednalo se bezesporu o jeden z nejvýznamnějších vynálezů lidstva. V prvopočátku se kolo neužívalo v podobě, jaké ho známe dnes, ale jako kůly, které se podkládaly pod sáně nebo břemena tažené buď lidmi, nebo domestikovanými zvířaty. Tato technologie výrazně ulehčovala práci a čas tím, že místo aby se sáně smýkaly po podložce s velkým třením, tak převáděla toto smykové tření na valivý odpor, který je výrazně menší.



Obr. 1 Sumerský vůz tažený onagerem 2800-2300 př.n.l. [38]

Pak přišla na řadu plná, dřevěná kola, která se již podobala těm, jak je známe dnes. Byla vyrobena buď z jednoho kusu, nebo spojením více prken a upravením do požadovaného tvaru. Tato kola se používala u jednonápravových, nebo dvounápravových vozů tažených dobyt看em. Díky tomu pak lidé mohli převážet i větší náklady na delší vzdálenosti. Tímto ulehčením mohli snadněji migrovat a osídlovat nové oblasti, stejně jako později rozvíjet obchod.

Dalším vývojovým stádiem bylo loukotové kolo, které bylo výrazně lehčí a konstrukčně vyspělejší, obzvláště když byl jeho obvod zpevněn ocelovou obručí, posléze ještě opatřen gumovým pásem pro větší jízdní komfort. Jednalo se o obruč vyrobenou z ohýbaného dřeva a spojenou se středem kola paprsky – loukotěmi. První zmínky o loukotovém kole pochází z let okolo 1500 před naším letopočtem. Tato kola byla osazena na dvukolových vozech a kočárech a v podstatě bez výraznější změny se používala až do roku 1887, kdy irský zvěrolékař John Boyd Dunlop poprvé v historii instaloval svému synovi na tříkolku předchůdce nafukovací pneumatiky. Jednalo se o kus zahradní hadice napuštěné vzduchem.

Tento moment se stal revolucí v historii pozemní dopravy, jelikož mnohonásobně zvýšil komfort jízdy. Zprvu se pneumatiky používaly u jízdních kol, ale velice rychle si našly cestu i na kola automobilová.

Tam byly použity ještě v kombinaci s loukoťovým kolem, ale s nástupem ocelových ráfků poté plynule přešly i na tyto.

S ohledem na trend vyrábět co možná nejlehčí ráfky, přišli konstruktéři se slitinami různých kovů, ať už to byl hliník, nebo magnézium. Poslední novinkou jsou pak kola vyráběná z uhlíkových vláken, kdy ráfek pro sportovní automobil váží pouhých 2,76 kg.

Tato technologie pronikla i mezi jízdní kola, takže už i špičková závodní kola jsou touto technologií vybavena. Moderní závodní kolo má z uhlíkových vláken vyrobeny nejen ráfky, ale také rám, šlapadla a spoustu dalších prvků k optimalizování hmotnosti.



Obr. 2 Sportovní ráfek z uhlíkových vláken [40]

1.2 VÝVOJ JÍZDNÍHO KOLA

Již od nepaměti vedla člověka touha po jednodušším a pohodlnějším způsobu cestování, proto se snažil svůj pohyb zjednodušovat a převádět část své námahy na něco, nebo někoho jiného.

Jednoznačně určit, kdo jako první zkonstruoval předchůdce dnešního bicyklu, se už zřejmě nikdy nepodaří. O prvenství se hlásí hned několik osob. V roce 1492 pravděpodobně Leonardo da Vinci zakresluje dvoukolový stroj, který se nápadně podobá dnešnímu kolu, je totiž poháněn soustavou pák a řetězem na zadní kolo. Kolem roku 1643 pak zase neznámý malíř nakreslil v kostele ve vesnici Stoke Poges anděla sedícího obkročmo na dvoukolovém vozidle. Roku 1791 Francouz Medé de Sivrac zkonstruoval tzv. "rychlloběžku" – céleriferu. Ta již nebyla pouhým vyobrazením, ale funkčním strojem. Bohužel se však rychloběžky více nerozšířily, protože neměly žádné směrové ovládání, pedály a ani brzdy. Také cena v té době odpovídala hodnotě koně. Každopádně se jednalo o stroj plně poháněný lidskou silou, který sice jako většina nových vynálezů ve své době nedošel ocenění, ale pro budoucí vývoj měl velký význam.



Obr. 3 Célerifera [33]

V roce 1813 zkonstruoval Karel Friedrich von Drais tzv. „drasinu“, která si získala velkou oblibu u veřejnosti. Sice se stále jednalo o dosti nepohodlný stroj, ale dal se již ovládat směr jízdy. Přednosti svého vynálezu pak Drais prezentoval na ukázkové trase z Karlshure do Strasburgu. Tuto cestu zvládl za čtyři hodiny, když pěšky tato cesta trvala až šestnáct hodin. Po rovině a kvalitním povrchu se jistě jezdilo na drasině pohodlně, ovšem problém nastal, při jízdě do kopce, nebo po nezpevněném povrchu. To se pak projeví všechny neduhy, jako vysoká hmotnost, která bránila pohodlnému překonání stoupání, stejně jako jezdec pocíťoval každou nerovnost, přes kterou přešel. O drasině existuje i zmínka v českém literárním díle Slávy dcera básníka Jana Kollára. Během let pak přicházeli různí vynálezci s vylepšeními. Nejvýznamnějším pak bylo opatření předního kola šlapátky a instalace brzdy, což si nechal roku 1863 patentovat francouz Pierre Michaux. Odpadl tak kontakt nohou se zemí a rovněž zastavení bylo bezpečnější. Stroj byl nazván „vélocipede“ a toto označení přečkalo až do dnešních dní. Pozdější vylepšení se pak týkalo kol, kdy dřevěné loukotě byly nahrazeny drátěným výpletem, což si nechal roku 1867 patentovat angličan Madison.



Obr. 4 Drasina [21]

Tato vylepšení znamenala velký průlom ve vývoji jízdních kol a překonala rychlostí i ovládním do té doby rozšířenou klasickou drasinu. Své přednosti pak tato kola předvedla v závodě pořádaném otcem a synem Michauxovými, který byl vypsán na 1200 metrů v Saint-Cloudu u Paříže v roce 1868. Tato reklama byla pro Michauxovy impulzem k založení první továrny na jízdní kola s názvem Michaux a Lallement. Pro kola produkovaná touto továrnou se vžil název kostitřas, anglicky pak boneshaker. Vinou přímého převodu šlapátky na přední kolo se toto postupně zvětšovalo až na průměr dvou metrů pro dosažení vyšší rychlosti. Zadní kolo bylo nepoměrně menší, cyklista seděl nad předním kolem, kde byla také umístěna řídítka. Toto řešení mělo řadu nevýhod, jako bylo obtížné nastupování, vysoké těžiště a tím pádem špatná stabilita.

V Anglii bylo roku 1870 patentováno první celokovové vysoké kolo, které bylo opatřeno pryžovou obručí na ráfcích. Další rozvoj pak znamenala sériová výroba valivých ložisek během 70. let 19. století, stejně tak účinnější brzdy. Tím se jízda dosti zpohodlnila.



Obr. 5 Kostitřas [36]



Obr. 6 Kostitřas [36]

Podobu jízdnímu kolu tak, jak ji známe dnes, dal roku 1885 John Kemp Starley. Svůj vynález pojmenoval Rover safety cycle a hlavní inovací bylo, že přední i zadní kolo bylo stejného průměru a pohon byl řešen pomocí ozubených kol a řetězu. Právě převodový poměr mezi hnacím a hnaným ozubeným kolem umožnil zmenšení hnaného kola při zachování dosažené maximální rychlosti. Toto uspořádání činilo z kola opravdu bezpečný dopravní prostředek, protože jezdec již neseděl nebezpečně vysoko, taktéž celková konstrukce byla výrazně lehčí. Dalším vylepšením pak byla planetová převodovka v náboji hnaného kola, kterou uvedla na trh v roce 1903 firma Sturmey Archer, kterou v 50. letech nahradila přehazovačka s přesmykačem. Tato koncepce se udržela až do dnešních dní.



Obr. 7 Rover safety cycle [37]

1.3 SOUČASNÉ TRENDY

Dále se vývoj ubíral různými směry dle požadavků uživatelů, takže vznikala kola specializovaná na jednotlivé cílové skupiny.

1.3.1 SPORTOVNÍ SILNIČNÍ KOLA

Moderní silniční kola pro vrcholové sportovce jsou vyráběna nejmodernějšími technologiemi, jak už to u vrcholového sportovního náčiní bývá. Rám, ráfky i pneumatiky jsou vyrobeny z karbonu, ostatní díly jako brzdové páčky, sedlo a podobně jsou vyrobeny z titanu pro



Obr. 8 Merida Reacto 909-20 [34]

dosažení co možná nejnížší hmotnosti. Takové kolo v hodnotě stovek tisíc korun pak váží okolo šesti kilogramů. Jsou to kola pro specializovanou skupinu cyklistů k podávání těch nejlepších sportovních výkonů a zároveň to nejmodernější, co se v současnosti v oblasti tradičních kol vyskytuje. Poloha jezdce je koncipovaná tak, aby jeho čelní plocha při jízdě byla co nejmenší a minimalizoval se tak vzdušný odpor, jelikož mezinárodní pravidla silniční cyklistiky neumožňují použití žádných aerodynamických prvků.

1.3.2 HORSKÁ KOLA

Horská kola jsou určena pro vyznavače jízdy v terénu a volné přírodě stran zpevněných silnic. Vyznačují se robustnější konstrukcí, taktéž širokými a silnějšími pneumatikami, často s odpruženou přední vidlicí. Poloha cyklisty na kole není ovlivněna dosažením co nejlepší aerodynamiky, spíše je požadavek kladen na dobrou ovladatelnost v obtížném terénu. Tato kola bývají také opatřena kvalitními brzdami, nejčastěji kotoučovými.



Obr. 9 Merida Matts TFS 200-D [34]

1.3.3 TREKINGOVÁ KOLA

Jsou kompromisem mezi horským a silničním kolem, kdy není vysoký požadavek na pevnost rámu, stejně tak na odolnost pneumatik, proto jsou použity relativně úzké s nižším odporem, než bývá u kol horských. Taktéž jsou tato kola uzpůsobena pro dlouhé cestování, takže se na ně dá upevnit celá řada vybavení a pomůcek pro co možná neefektivnější využití. Bývají vybavena nosičem pro brašny, držákem map, různými kapsami pro uložení rozličných věcí. Posez na takovýchto kolech bývá zpravidla pohodlný pro překonávání větších vzdáleností.



Obr. 10 Merida Crossway TFS-300V [34]

1.3.4 SPECIÁLNÍ KOLA

Do této kategorie lze zařadit všechna kola, která se vyznačují jinou, než běžnou koncepcí. Jedná se například o různé typy lehokol, kapotovaných kol, tandemů a podobně. Lehokola se vyznačují efektivnějším využitím lidské síly, taktéž minimalizují čelní plochu, proto cyklista může dosahovat vyšších výkonů při nižší námaze. Jízda na takovém to kole má však i svá úskalí. Vyžaduje jistou dávku zkušeností a cviku, cyklista je pro svou polohu nízko nad vozovkou špatně viditelný a lehce přehlédnutelný pro řidiče automobilů.



Obr. 11 Lehokolo [34]

Kapotovaná kola vznikla za účelem minimalizace vzdušného odporu a pohodlí při nepříznivých klimatických podmínkách.

S kapotovaným bicyklem dosáhl roku 2001 v Kolumbijské poušti kanadský jezdec Sam Whittingham světového rekordu v jízdě na 200 m po rovině. Jel úctyhodnou rychlostí 130 km/h.



Obr. 12 Sam Whittingham [35]

Nejnovějším trendem ve fitness cvičení je tzv. „Runbike“, kdy jezdec zapojuje celé tělo a aktivuje svalstvo hlubokého stabilizačního systému. Tím napomáhá ke zlepšení koordinačního systému a absence sedla pak nutí cyklistu jet ve vzpřímené poloze, což má dobrý vliv na páteř a zádové svalstvo.



Obr. 13 Runbike [41]

1.3.5 ELEKTROKOLA

Samostatnou skupinu tvoří elektrokola, která se začala více rozšiřovat s nástupem moderních akumulátorů. Ty jsou schopny ukládat dostatečné množství energie při přijatelné hmotnosti. Jako nejvhodnější se prozatím jeví Li-Ion baterie, které nabízí vysokou hustotu energie a účinnost se jmenovitým napětím 3,6V. Jsou však stále poměrně drahé a při úplném vybití dochází k rychlému zkracování životnosti, lze je však průběžně dobíjet. Současná elektrokola jsou konstruována hlavně pro městskou jízdu, jako je dojíždění do práce, školy a jako řešení pro slabší cyklisty. Běžná vzdálenost, kterou lze na tomto kole ujet, je až 75km. Maximální dojezd ovlivňují povětrnostní vlivy, především okolní teplota, hmotnost jezdce a členitost terénu.

Elektronickou část kola upravuje norma ČSN EN 15194, která jasně určuje požadavky na elektrický obvod, vodiče a jejich kontakty, řízení výkonu, maximální rychlost a podobně. Jmenovitý výkon motoru nesmí přesáhnout 250W, i když jsou na trhu motory o výkonu až 1000W. Také maximální povolená rychlost s asistencí elektromotoru je omezena na 25km/h. Pokud je tato rychlost překročena, již se jedná o malý skútr, na který se vztahuje vyhláška Ministerstva dopravy. Kolo pak musí být opatřeno registrační značkou, řidič je povinen mít bezpečnostní přilbu, taktéž musí mít vozidlo zaplacenou povinné ručení a projít Stanicí technické kontroly.



Obr. 14 Wisper 906 Alpino [34]

2 STAVBA SILNIC A CYKLOSTEZEK

Pro pohodlnou, bezpečnou a rychlou dopravu je nezbytné jet po kvalitním zpevněném povrchu, proto tato kapitola obsahuje historický přehled vývoje silnic a současné trendy v budování cyklostezek.

2.1 SILNICE

Ze stejné doby, jako jsou první zmínky o kolech, je i záznam o vůbec první silnici, protože do té doby se lidé pohybovali po stezkách vyšlapaných divokou zvěří, případně si tvořili své.

První silnice, o které existují bezpečné záznamy a také datum výstavby, je dřevěná silnice v Anglii. Byla postavena z prachů, proto lze bezpečně pomocí letokruhů určit, že byla postavena na přelomu let 3806 a 3807 před naším letopočtem. Další cesty pak vznikaly postupně s rostoucím obchodem.

Následující významnou silnicí byla Royal Road, kterou nechal okolo roku 500 před naším letopočtem postavit perský král Dareios I. Jednalo se o do té doby nevidanou stavbu, která se táhla od západního pobřeží Turecka až po Perský záliv. Měla ohromný význam pro obchod na blízkém východě.

Největšího budování silnic ve starověku dosáhla Římská civilizace, kdy během svého rozmachu od roku 312 před naším letopočtem spojila 29 hlavních měst a položila přes 78,000 kilometrů kamenných silnic. Tyto sloužily nejen k pohodlnějšímu a rychlejšímu přesunu římských vojsk, ale také jako obchodní trasy.

V osmém století našeho letopočtu se v Bagdádu začíná používat ke zpevňování silnic asphalt, který slouží k jejich stavbě dodnes.

První dálnice na světě byla vybudována roku 1921 v Itálii a spojila město Milán s Varese. Od tohoto data se síť dálnic začíná rychle rozrůstat po celé Evropě a o největší rozmach se postará Německo v předválečném období a za války, kdy se staví dálnice především pro rychlé přesuny vojsk. Tyto jsou ve velké míře panelové, postupně se pak technologie vrací

z hlediska pohodlí k asfaltovým směsím.



Obr.15 Kamenná silnice v Pompejích

V současnosti je trendem v Evropské unii propojit celou Evropu sítí dálnic, aby se urychlilo cestování a přeprava nákladu na co možná nejkratší dobu s ohledem na vyšší bezpečnost. Evropská unie na tyto stavby vydává nemalé částky ze společného rozpočtu.

2.2 CYKLOSTEZKY

Dnes patří moderní a kvalitní silnice mezi základní pilíře pozemní dopravy a denně je využívají lidé po celém světě k dojíždění do zaměstnání, k přepravě nákladů, cestování, ale i k volnočasovým aktivitám.

Vzhledem k sílící automobilové dopravě je však čím dál obtížnější tyto volnočasové aktivity, mezi které patří především jízda na kole a kolečkových bruslích, uskutečňovat na běžných komunikacích. Proto je v poslední době trendem budování kvalitních asfaltových cyklostezek, které jsou buď úplně stranou od běžných silnic, nebo jako vyhrazený jízdní pruh, potažmo ve městech též jako součást chodníků pro chodce.

V České republice vyniká rychlou a efektivní stavbou sítě cyklostezek město Opava, které získalo v roce 2010 1. místo v soutěži Cesty městy od Nadace Partnerství, která vznikla spojením Škoda Auto a Ministerstva Dopravy ČR. Porota především ocenila, že se architektům podařilo najít prostor pro cyklisty na již stávajících komunikacích a propojit všechny části města tak, že se dá projet celým městem bezpečně na kole. Zároveň pak tyto stezky navazují na hustou síť v okolí města, která je situovaná z větší části v přírodě.

Ovšem nejen toto město, ale i většina dalších se podílí na podpoře cykloturistiky a rozvoje cyklistiky jako alternativy k automobilové dopravě. Vždyť cyklista je schopen se pohybovat na kole v běžném provozu rychlostí 15-25 km/h, což je obdobná rychlost, kterou se pohybují automobily v dopravní zácpě. Nejenže však cyklista trénuje své tělo a zlepšuje si tělesnou kondici, ale také neobtěžuje své okolí jedovatými exhalacemi výfukových plynů. Taktéž parkování jízdního kola je snazší, než parkovat automobil v přeplněných městech.

Z tohoto pohledu je cyklistika určitě přínosem a při pohledu do přelidněných asijských měst, pak logickým vyústěním obtížné situace s automobilovou dopravou ve velkých městech, kde většina lidí jezdí buď na malém motocyklu, nebo právě na jízdním kole.

Se zajímavým řešením rostoucí dopravy přišli zastupitelé v Londýně, kde zpoplatnili výrazným způsobem vjezd do centra města a zároveň instalovali jakési samoobslužné půjčovny kol. Tato kola jsou k zapůjčení buď po předchozí registraci na internetu a pomocí čipové karty, nebo přímo kreditní kartou. Člověk jednoduše zaplatí u terminálu, kolo se odblokuje ze stojanu a může vyrazit na cestu. Po celém Londýně je instalováno 400 těchto stanic s 6000 koly, takže jakmile dotyčný dorazí na potřebné místo, jednoduše kolo zase vrátí do stojanu a odchází.



Obr. 16 London Cycle Hire [39]

V Evropě pak mezi cyklistické velmoci patří Holandsko, kde je místy až 40% městské dopravy realizováno na kolech. S velice pěkným a propracovaným systémem stezek se pyšní německý Mnichov, kde i centrum města je plné lesoparků, kam mohou lidé bezpečně zavítat na kole a vyhnout se tak každodenním zácpám a smogu. Pro jízdu do zaměstnání využívá jízdní kolo až 35% obyvatel Mnichova.

Česká republika, jak již bylo uvedeno, tento trend sleduje, ovšem stále zde platí jistá společenská úskalí cyklistické dopravy. Ne každý podnik je totiž vybaven, nebo řekneme-li připraven na zaměstnance dojíždějící do práce na kole. Málokde se najde vyhrazené místo na bezpečné uschování kola, stejně tak na málokterém pracovišti je zařízena šatna se sprchou. Taktéž každodenní bezohlednost spojená s agresivitou řidičů rozhodně cyklistům nenahrává.

I tak mají cyklisté při dojíždění do zaměstnání a školy své zastoupení a například v Uherském Hradišti nebo Prostějově je to až 20% ze všech dojíždějících. Nejhůře jsou na tom pak velká města, jako je Brno a Praha, kde se jedná o pouhé 2%.

V již zmiňovaném Holandsku, konkrétně ve městě Krommenie u Amsterdamu, má být v roce 2012 instalovaná světově první cyklostezka, která zároveň bude sloužit jako solární elektrárna. U projektu nazvaného SolaRoad se očekává, že každý metr čtvereční stezky vyrobí až 50 kWh za rok. Stezka má být vyrobena z betonových panelů, na nichž budou umístěné solární články kryté 1 cm silnou vrstvou tvrzeného protiskluzového skla. Podobným projektem se také zabývají vědci ve Spojených státech na popud Ministerstva energetiky, kdy vyvíjí tzv. SolarRoads. V tomto případě se jedná o panely s plochou 13,5 m², které jsou schopny do sítě dodávat 7,6 kWh denně. Taktéž tyto panely mohou být vybaveny LED diodami pro aktuální informace pro řidiče na cestě, nebo pro změnu organizace v dopravě, stejně tak topnými tělesy, které zabrání vzniku námrazy v zimním období. 1,5 km čtyřproudé solární silnice pak pokryje potřebu 500 domácností. Nevýhodou je však vysoká cena, kdy jeden takový panel přijde na zhruba 7000 dolarů.



Obr. 17 SolaRoad [18]

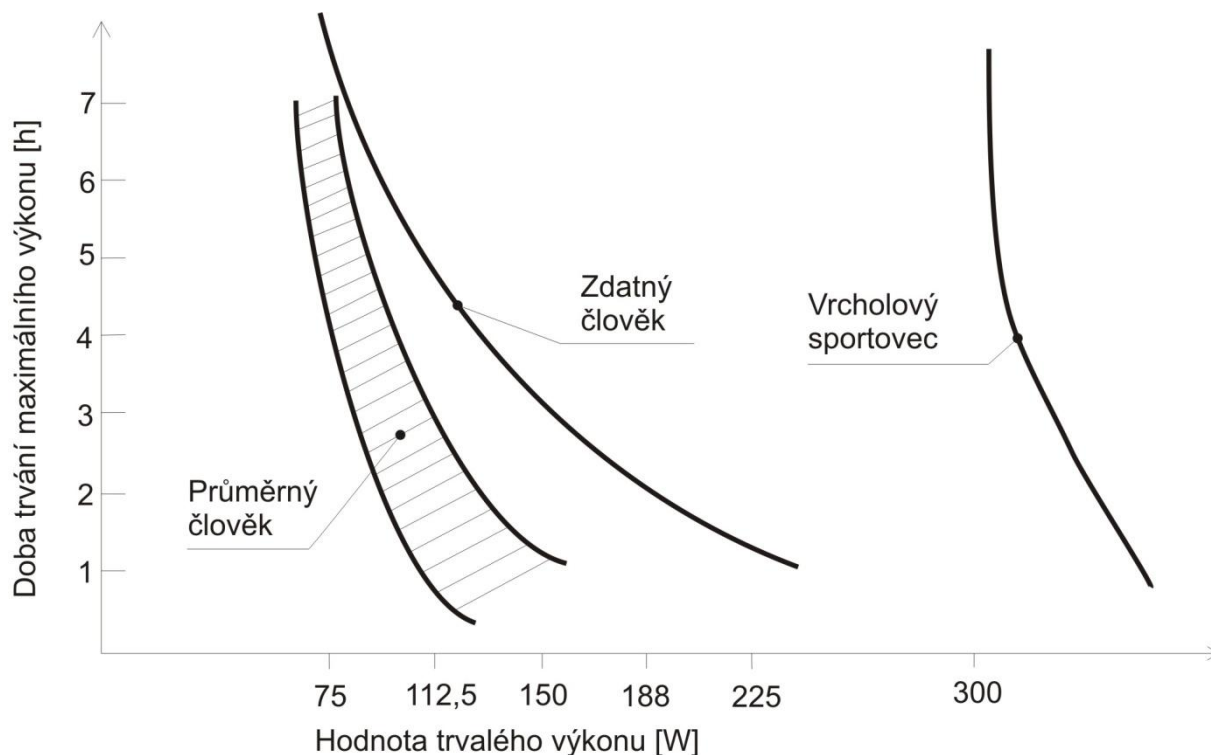
3 REKUPERACE ENERGIE

Rekuperace je proces přeměny kinetické energie při zpomalování vozidla na energii chemickou nebo mechanickou, která je zpětně použita ke zrychlení tohoto vozidla. Obnova energie má tak za následek uspoření paliva, potažmo lidské síly. Cílem této práce však není návrh systému, který pouze energii rekuperuje, ale takový, který umožní plynulou změnu pomoci jezdcí. Jedině tak lze dosáhnout toho, aby jízda byla kondičním cvičením, nikoli jen vožením se. Primárním pohonem tohoto vozidla pak není elektromotor, ale vlastní svaly cyklisty, elektromotor je pouze pomocný.

3.1 VÝKONNOST LIDSKÉHO ORGANISMU

Lidský organismus je od přírody postaven tak, aby odolával fyzické námaze. V dřívějších dobách, kdy se lidé živili ve větší míře fyzickou prací, postačoval tento životní styl k dobré duševní a tělesné kondici. Dnes však většinu těžké práce obstarávají stroje a člověk pouze plní roli obsluhy či uživatele. Moderní pohodlný život využívající k dopravě motorizovaných vozidel, nezdravé stravování a celkový omezený pohyb však vede k civilizačním chorobám, jako je obezita, nemoci kardiovaskulárního systému a podobně. Pro zdravý životní styl je proto potřeba dřívější přirozenou námahu nahrazovat kondičním cvičením.

K návrhu rekuperační soustavy, která má plnit účel takového cvičení, je potřeba znát výkon lidského organismu. Ten lze získat zátěžovým měřením v laboratoři pomocí speciálního rotopedu a měřících snímačů na lidském těle. Lze tak získat graf pro různé zdatné sportovce.



Graf 1 Výkon lidského těla

Při návrhu se pak počítá s tím, že část cyklistova výkonu bude odebírána pro dobíjení superkapacitoru při jízdě z kopce a případně i po rovině, zbytek pak poslouží pro pohon

bicyklu. K určení tohoto poměru energie slouží regulátor zatížení, je to obdoba regulace u rotopedu. Řízení pak obstarává řídící jednotka. Viz. *Kapitola 4*.

3.2 AKUMULACE ENERGIE

Jednou z nejdůležitějších součástí celého systému rekuperace je úložiště energie. Slouží k uložení jinak mařené kinetické energie při brzdění jízdního kola v několika formách. Může se jednat o energii mechanickou, například zkrucování gumového svazku, nebo elektrickou uloženou v bateriích nebo kapacitorech, tlakovou jako stlačený vzduch v zásobníku a kinetickou uloženou v setrvačniku. Pro jeho realizaci u HPV se nabízí hned několik typů, ne všechny jsou však vyhovující. Především by mělo splňovat parametry vhodné pro použití u HPV a to:

- nízká hmotnost
- dostatečná kapacita
- jednoduchá údržba
- pro sériovou výrobu nízké výrobní náklady

3.2.1 GUMOVÝ SVAZEK

Gumový svazek zná většina lidí z modelářství, kde se používá pro pohon nejčastěji leteckých modelů. Tam se energie nahromadí zkroucením letecké gumy, potažmo gumového svazku, která se zpětně mění v kinetickou pomocí přímého převodu přes vrtuli. Jedná se o velice primitivní způsob uchovávání energie a ani jeho použití pro rekuperaci u jízdního kola není příliš vhodné. Guma se musí stále udržovat mazáním ricinovým olejem, ale i tak velice brzy ztrácí své elastické vlastnosti. U tohoto systému je navíc obtížná regulace otáček a odebírání, potažmo ukládání energie a její maximální množství je taktéž nedostatečné. V podstatě při brzdění a následném zkrucování gumy sice dochází k ukládání energie, ovšem kapacita svazku je velmi omezená a průběh samotného pohonu je nelineární a obtížně regulovatelný. Výhodou se pak zdá být nízká hmotnost a také nízká pořizovací cena.



Obr. 18 Letecká guma [31]

3.2.2 SETRVAČNÍKOVÉ AKUMULÁTORY

Snad každý chlapec si v dětství hrál s autíčkem na setrvačník, který nejprve řádně roztočil a pak autíčko vypustil a ono po určitou dobu jelo. V tomto případě se jednalo o jakýsi prvotní jednoduchý, leč efektivní systém. Použití setrvačníku jako energetického úložiště se již v praxi osvědčilo a poměrně dost rozšířilo v osobní přepravě i motorsportu, taktéž jako stacionární úložiště pro energetické přebytky. Setrvačník je rotační zařízení pro akumulaci kinetické energie. Obvykle má tvar dutého nebo plného válce, případně kola s paprsky. Využívá se jeho momentu setrvačnosti. Za setrvačník lze považovat všechna tělesa, která rotují.

Kinetická energie E_k vázaná v rotujícím setrvačníku se vypočte podle následujícího vzorce:

$$E_k = 1/2 J \cdot \omega^2,$$

kde J je moment setrvačnosti tělesa vzhledem k ose otáčení, ω je úhlová rychlost, s kterou se těleso otáčí. Protože je úhlová rychlost přímo úměrná frekvenci ($\omega = 2\pi f$), lze použít i vzorec:

$$E_k = 2 \cdot \pi^2 \cdot J \cdot f^2,$$

kde f je frekvence otáčení v otáčkách za sekundu.



Obr. 19 Jednotka KERS formulového závodního vozu [9]

Použití setrvačníku pro rekuperaci u HPV má svá úskalí. Při použití jednoho setrvačníku by se cyklista musel vyrovnat s gyroskopickým momentem, který by mu buď nedovoloval zatočit, nebo přetěžoval ložiska v nábojích kol. Řešením se zdá být umístění dvou setrvačníků ve stejné rovině s opačným smyslem otáčení, tím se ovšem zdvojnásobí hmotnost celé soustavy. Taktéž řešení převodu při odebírání a zpětném navrácení energie by bylo konstrukčně a hmotnostně náročné, stejně jako regulace, množství a směr energetického toku.

3.2.3 TLAKOVÁ NÁDOBA

Tlaková nádoba slouží k ukládání energie v podobě stlačeného vzduchu pomocí kompresoru, který odebírá mechanickou energii, mění ji na tlakovou a zpětně pak zase jako motor poháněný expanzí stlačeného vzduchu tuto energii vrací. Tento způsob uchovávání energie má v jistých odvětvích své opodstatnění, ovšem pro využití rekuperace u HPV se zdá být nevhodný. Mechanické a tepelné ztráty při stlačování vzduchu nesou spoustu nevýhod, které zabraňují efektivnímu využití pro tento typ vozidla.



Obr. 20 Možné řešení tlakového zásobníku s kompresorem [29]

3.3 ELEKTRICKÁ ENERGIE

Pro uložení elektrické energie je v největší míře využito baterií, v současnosti se však do popředí díky nanotechnologii dostávají také superkapacitory, případně u moderních hybridů kombinace těchto dvou.

3.3.1 BATERIE

V baterii je energie vázaná chemicky v elektrolytu. Je dána chemickou reakcí mezi dvěma elektrodami, které jsou vyrobeny z různých materiálů a tím mají specifické vlastnosti. Prostor mezi nimi je vyplněn elektrolytem, ve kterém probíhá příslušná chemická reakce. Pro použití u hybridních vozidel se jeví jako nejvýhodnější Ni-MH baterie, která není svou chemickou stavbou tolik nebezpečná, jako například Ni-Cd baterie. Aby však baterie správně fungovala, je potřeba udržovat stále napětí nad 50% kapacity, což by v praxi znamenalo, že by bicykl musel být v době nečinnosti neustále připojen k elektrické síti. Taktéž pro začátek dobíjení je potřeba jistá časová prodleva k zahájení chemické reakce a tento jev je velice nepříznivý při využití u bicyklu, kde se předpokládají kratší časové intervaly dobíjení a nízký, nepravidelný proud.

3.3.2 SUPERKAPACITORY

Z hlediska rychlosti absorpce a množství přivedené energie při rekuperování se jeví nejvýhodnější superkapacitor, který byl i zvolen k návrhu příslušné rekuperační soustavy. Proto více o superkapacitorech v *Kapitole 4*, srovnání s bateriemi pak v *Tabulce 2*.

4 NÁVRH REKUPERAČNÍ SOUSTAVY

Po shrnutí všech použitelných typů soustav pro rekuperaci, se v této kapitole nachází ideový návrh pro řešení rekuperace u HPV.

4.1 ELEKTRONICKÁ SOUSTAVA

V elektronické soustavě je pohon vozidla řešen elektromotorem. Vzhledem k legislativě, která povoluje výkon maximálně 250W, volím tento motor. Jedná se o stejnosměrný bezkartáčový elektromotor s volnoběžnou osou v předním kole, který lze rovněž použít pro generování elektrického proudu a tím zpomalovat vozidlo. Jako úložiště energie volím superkapacitor, jehož vlastnosti jsou rozebrány ve 4. kapitole.



Obr. 22 Elektromotor v náboji kola [17]



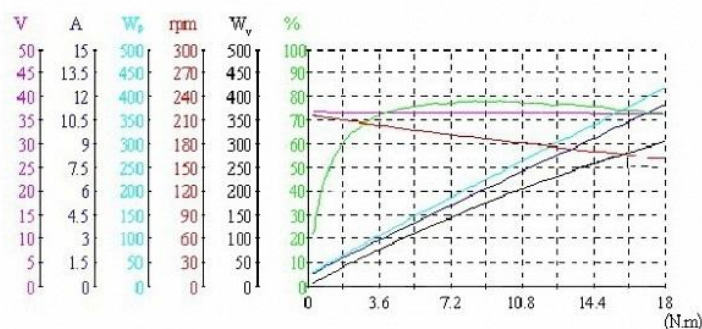
Obr. 21 Superkapacitor Maxwell [8]

4.1.1 ELEKTROMOTOR

V principu lze každý elektromotor využít jako generátor. Rozdělit bychom je mohli na stejnosměrné - dynamo a střídavé - alternátory, pak s vlastním buzením a cizím buzením. Dále s permanentními magnety, nebo elektromagnety. Těch dělení by bylo ještě víc. Vezme-li se tedy jakýkoliv komutátorový stejnosměrný motor, tak při jeho mechanickém roztočení se začne chovat jako dynamo. Z počátku se využívá jeho zbytkového magnetického pole k nabuzení budícího vinutí. Tento budící proud se neustále zvětšuje a při dosažení jistých otáček se již téměř nemění. Odebíraný výkon je pak závislý na konstrukci elektromotoru, jako je průměr vinutí, rychlost otáčení, velikost cívky pohybující se v magnetickém poli atd. Ještě bych chtěl podotknout, že při využívání motoru jako dynamo, by měl být směr otáčení opačný, protože stírací uhlíky na komutátoru jsou poněkud přesazeny z důvodu zhuštění elektromagnetického pole. Konstrukčně jednodušší je ale generátor střídavého proudu, typicky "dynamo na kolo", kde se magnet otáčí a statorové cívky stojí. Tím odpadá sice poruchová a problematická konstrukce komutátoru a stíracích uhlíků, ale i možnost regulace napětí a výkonu pomocí buzení. Aby se odstranila tato nevýhoda, používá se konstrukce automobilová, kde výkonnostní vinutí jsou cívky statorové a budící vinutí cívky rotorové. Protože budícím vinutím protéká proud řádově setinový, není zapotřebí dělat komutátor nijak robustní. U střídavých synchronních elektromotorů je situace taková, že když tento motor roztočíme nad tzv. synchronní otáčky, tak motor začne proud vyrábět. Vyrábí proud střídavý,

jehož kmitočet je závislý na počtu otáček a magnetů. Jak už to tak bývá, každý generátor má svá pro a proti a použití toho vhodného je výsledkem souboru různých požadavků. S ohledem na požadavky řešené soustavy byl zvolen elektromotor dle *Tabulky 1*.

Tabulka 1 Parametry elektromotoru [9]

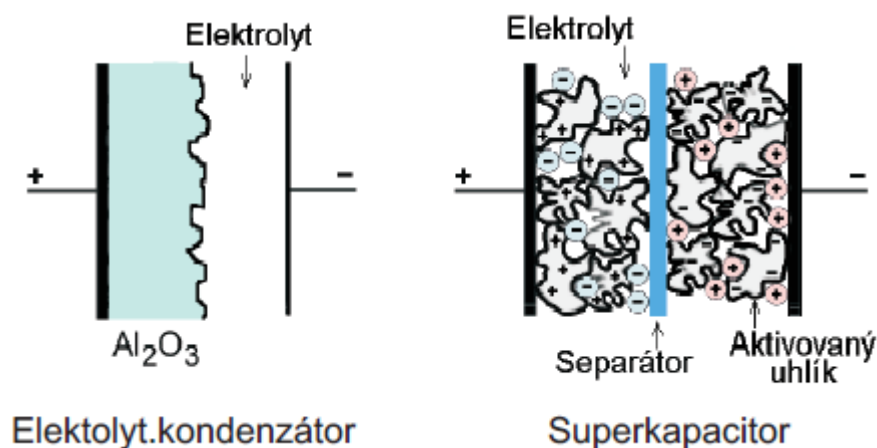


	Napětí [V]	Proud [A]	Příkon [W _p]	Krou. mom. [N.m ⁻¹]	Rychlost [km.h ⁻¹]	Výst. Výkon mot. [W _v]	Účinnost [%]
Volnoběh	36,66	0,83	30,3	0,29	28,09	6,69	22
Max. krouticí moment	36,32	12,3	446,7	19,41	20,45	319,5	71,5
Max. výstupní výkon	36,32	12,3	446,7	19,41	20,45	319,5	71,5
Max. Účinnost motoru	36,49	6,55	239,1	9,7	24,02	187,5	78,4

4.1.2 SUPERKAPACITOR

PRINCIP FUNKCE A KONSTRUKCE SUPERKAPACITORŮ

„Kapacita kondenzátoru je přímo úměrná ploše elektrod a nepřímo úměrná vzdálenosti elektrod (nábojů). Elektrody superkapacitoru tvoří práškový uhlík, nanesený na hliníkové fólii. Zrna uhlíkového prášku mají plochu a. 2000 m² na 1 gram prášku. Dvě elektrody jsou odděleny separační fólií z polypropylenu, prostor mezi elektrodami je vyplněn tekutým elektrolytem. Velká plocha elektrody a velmi malá vzdálenost jednotlivých zrn uhlíku (řádu 10⁻¹⁰m) vytváří kapacitu řádu Faradů. Vzdálenost uhlíkových zrn zároveň omezuje provozní napětí kondenzátoru na hodnotu cca 2.5V. Výsledkem je polarizovaný kondenzátor s velmi velkou kapacitou a velmi malým sériovým odporem, vhodný pro ukládání a rychlé dodávání elektrické energie.



Obr. 23 Porovnání konstrukce běžného kondenzátoru a superkapacitoru [8]

ELEKTRICKÉ PARAMETRY SUPERKAPACITORŮ

Elektrické parametry superkapacitorů jsou srovnatelné s parametry elektrochemických zdrojů (baterie, akumulátory). Energie uložená v superkapacitoru je řádově 10 krát vyšší než v běžném kondenzátoru. Malá hodnota vnitřního odporu umožňuje rychlé vybití, špičkový výkon dodaný superkapacitorem dosahuje hodnot řádu kW na 1 kg hmotnosti superkapacitoru.

Tabulka 2 Srovnání baterie, kondenzátoru a superkapacitoru [8]

Parametr	Akumulátor	Klasický kondenzátor	Superkapacitor
Hustota energie	100 Wh/kg	0,2 Wh/kg	10 Wh/kg
Měrný výkon	1 kW/kg	500 kW/kg	10 kW/kg
Doba nabíjení (vybíjení)	5 h	0,001 s	10 s
Životnost	1 000 cyklů	1 000 000 cyklů	1 000 000 cyklů

ŽIVOTNOST A PRACOVNÍ PODMÍNKY

Životnosti superkapacitoru je definována počtem cyklů nabití a vybití při teplotě okolí 25°C. Po každém cyklu se nevratně snižuje kapacita C a zvyšuje sériový odpor R_{sr} . Doba životnosti superkapacitoru je definována poklesem kapacity na 80% jmenovité hodnoty nebo zvýšením sériového odporu na dvojnásobek jmenovité hodnoty. Při opakovaném vybíjení a nabíjení s periodou cca 10s se teplota superkapacitoru zvýší cca o 15°C. Při návrhu aplikace se superkapacitorem se doporučuje měření oteplení superkapacitoru, aby se zabránilo přehřátí elektrolytu, jehož bod varu je 83°C. Superkapacitor nesmí být rozebírán, mechanicky poškozován, vhazován do otevřeného ohně, vystavován teplotám vyšším než 85°C. Únik látek, které superkapacitor obsahuje (acetonitril CH_3CN), může být za určitých podmínek nebezpečný.

VYROVNÁNÍ NAPĚTÍ NA SUPERKAPACITORECH ZAPOJENÝCH V SÉRII

Na superkapacitorech zapojených do baterie (do série) se napětí rozdělí podle velikosti kapacity jednotlivých článků. Po delší době je napětí na jednotlivých člancích ovlivněno zbytkovým proudem každého z článků. K vyrovnání napětí na jednotlivých člancích je možné připojit paralelně ke každému článku rezistor (pasivní vyrovnání). Pro použití baterie superkapacitorů v režimu cyklů s krátkou periodou je doporučena aktivní metoda, při které jsou k baterii připojeny spínače s proměnným odporem, jehož velikost je řízena skutečným napětím na člancích.“

[8]

Tabulka 3 parametry zvoleného superkapacitoru [8]

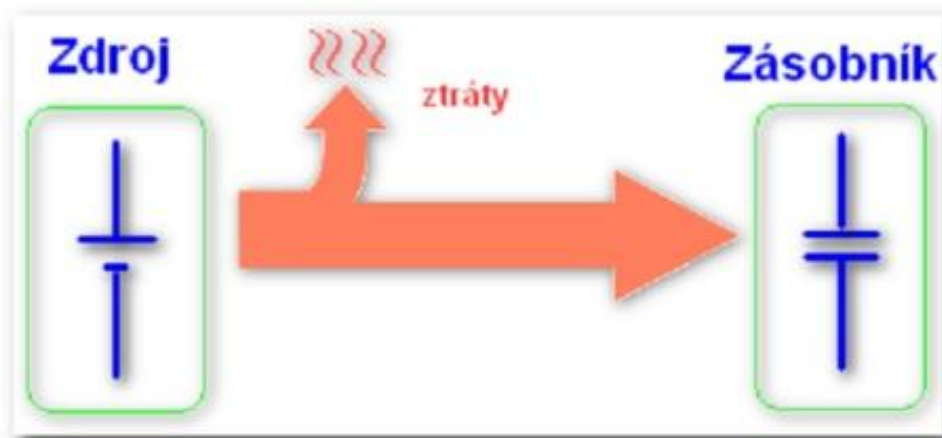
C	Un	Resr	Icc	Ip	Emax	P	Pd	Ic	L	W	S	hmotnost
F	V	mΩ	A	A	Wh/kg	kW/kg	kW/kg	mA	mm	mm	mm	kg
86	48,6	12,3	150	1080	2,48	5,4	2,0	3,0	416	108	53,7	11

Pro konstrukci systému je navržen superkapacitor dle Tab. 2. Jelikož je motor napájen 36V, pak navrhovaný zdroj plně postačuje a kapacita 86F také pokryje energetické potřeby systému. Pro ověření vhodnosti navrhovaného superkapacitoru slouží teoretická simulace jízdního manévru v kapitole 5.

4.1.3 NABÍJENÍ SUPERKAPACITORU

Nespornou výhodou superkapacitoru je oproti běžným bateriím jejich schopnost přijímat elektrický náboj okamžitě, v řádech milisekund od přivedení nabíjecího napětí. Toho lze s užitkem využít při rekuperaci energie na kole, kde je jízdní režim v čase proměnný a s ním i vybíjecí a nabíjecí proud.

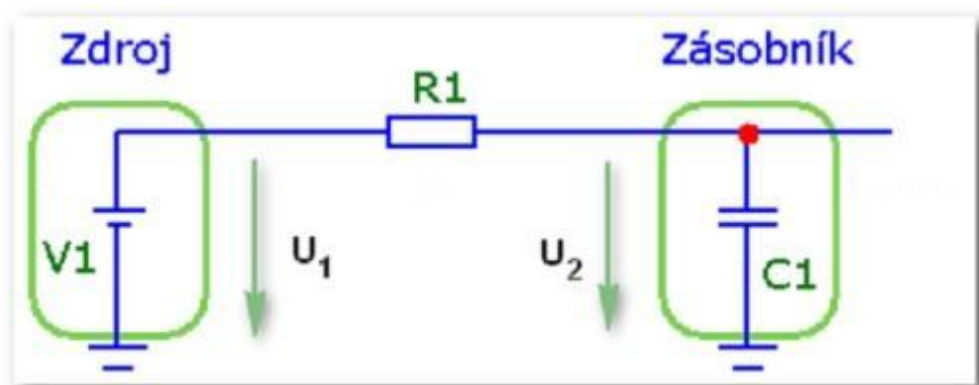
Pro dosažení co možná nejvyšší účinnosti při nabíjení je potřeba minimalizovat ztráty v obvodu.



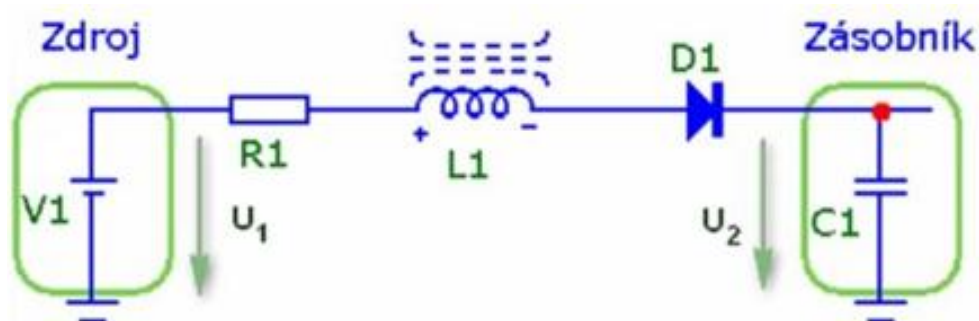
Obr. 24 Převod energie ze zdroje do zásobníku

U bateriového napájení, kde slouží kapacitor pouze k vyrovnávání špičkových odběrů, je výhodné do obvodu zapojit odpor R , který jej trvale dobíjí z vnějšího zdroje. Spotřebič pak může nárazově odebírat z kapacitoru větší proud, než jaký zdroj dodává.

S velikostí zařazeného odporu roste doba nabíjení, což šetří zdroj, ovšem pro potřeby rekuperace to nemá žádný význam. Naopak díky odporu, který část energie přemění na teplo, dochází ke ztrátám a nabíjecí účinnost je přibližně 50%. Tak nízká účinnost je pro navrhovaný systém krajně nevhodná, navíc bez usměrnění proudu dochází k rychlejšímu samovybíjení kapacitoru.



Obr. 26 Přenos energie odporem

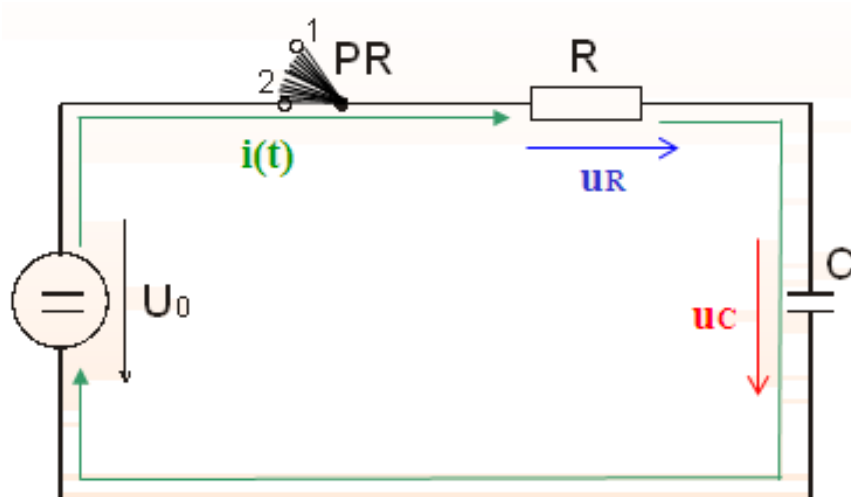


Obr. 25 Schéma zapojení nelineárního RL členu

Nabíjení je nejoptimálnější realizovat řízeně přes nelineární RL člen. Vhodně polarizovaná dioda zabránil vybití superkapacitoru zpět do zdroje. Je totiž potřeba striktně vymezit režim vybíjení a dobíjení. Zjednodušené schéma možného zapojení obvodu na obrázku.

4.1.4 SIMULACE NABÍJENÍ REÁLNÉHO SUPERKAPACITORU

V případě navrženého kapacitoru se pak jedná o konkrétní hodnoty. Pro zjednodušení obvodu mějme schéma zapojení dle obr. 27.



Obr. 27 Zjednodušené schéma zapojení

Pro simulaci jsou určeny počáteční podmínky, kdy:

$u_c(t)$	0	Kondenzátor je vybitý
$i(t)$	0	Obvod je rozpojený
u_r	0	vzhledem k tomu, že $i(t) = 0$, nevznikne na R úbytek napětí

Vzhledem k tomu, že kapacitor C je vybitý a R_v zdroje je roven nule, bude počáteční proud obvodem omezen pouze velikostí rezistoru R. V okamžiku připojení zdroje U_0 začne obvodem téct proud $i(t) = U_0/R$.

Kondenzátor se začne nabíjet přes odpor R a napětí u_c se bude měnit podle vztahu:

$$u_{cn}(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (4.1)$$

Pro průběh proudu i obvodem platí:

$$i(t) = \frac{U_0 - u_c(t)}{R} = \frac{U_0 - U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})}{R} = \frac{U_0 - U_0 + U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}}{R} = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.2)$$

Průběh napětí u na rezistoru R je dán vztahem:

$$u_r(t) = R \cdot i(t) = R \cdot \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.3)$$

Průběh vybíjení superkondenzátoru je dán vztahem

$$u_{cv}(t) = \frac{Q}{C} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.4)$$

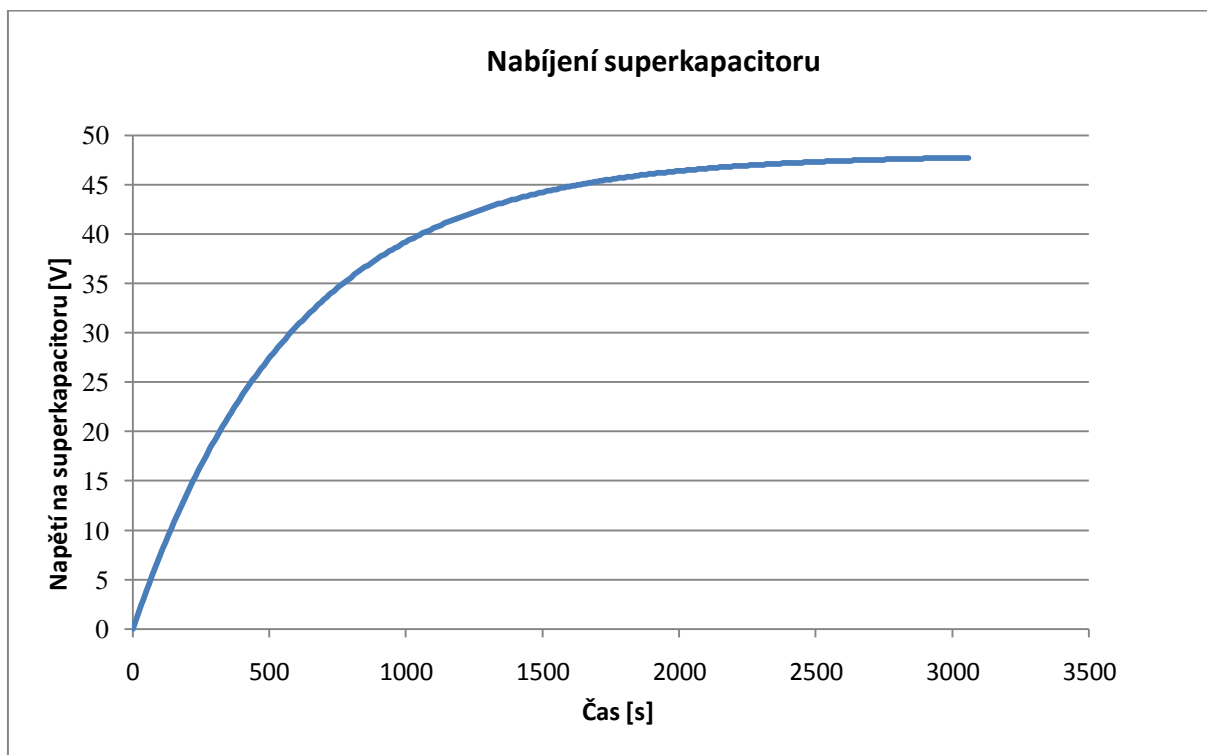
Časová konstanta τ ovlivňující všechny obvodové veličiny

$$\tau = R \cdot C \text{ [s, } \Omega, \text{F]} \quad (4.5)$$

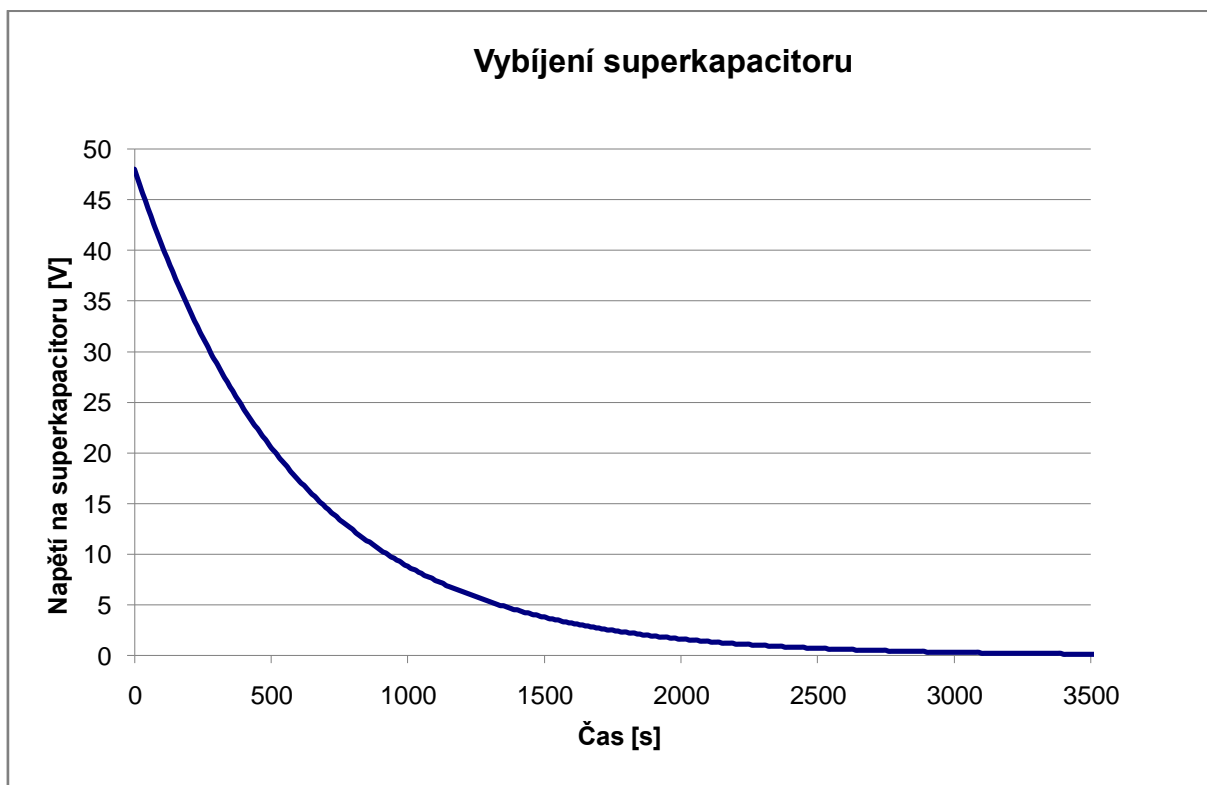
Vnitřní odpor motoru

$$R_m = \frac{U^2}{P} = \frac{36,6^2}{187,5} = 7,1 \Omega \quad (4.6)$$

PRŮBĚH NABÍJENÍ A VYBÍJENÍ SUPERKONDENZÁTORU

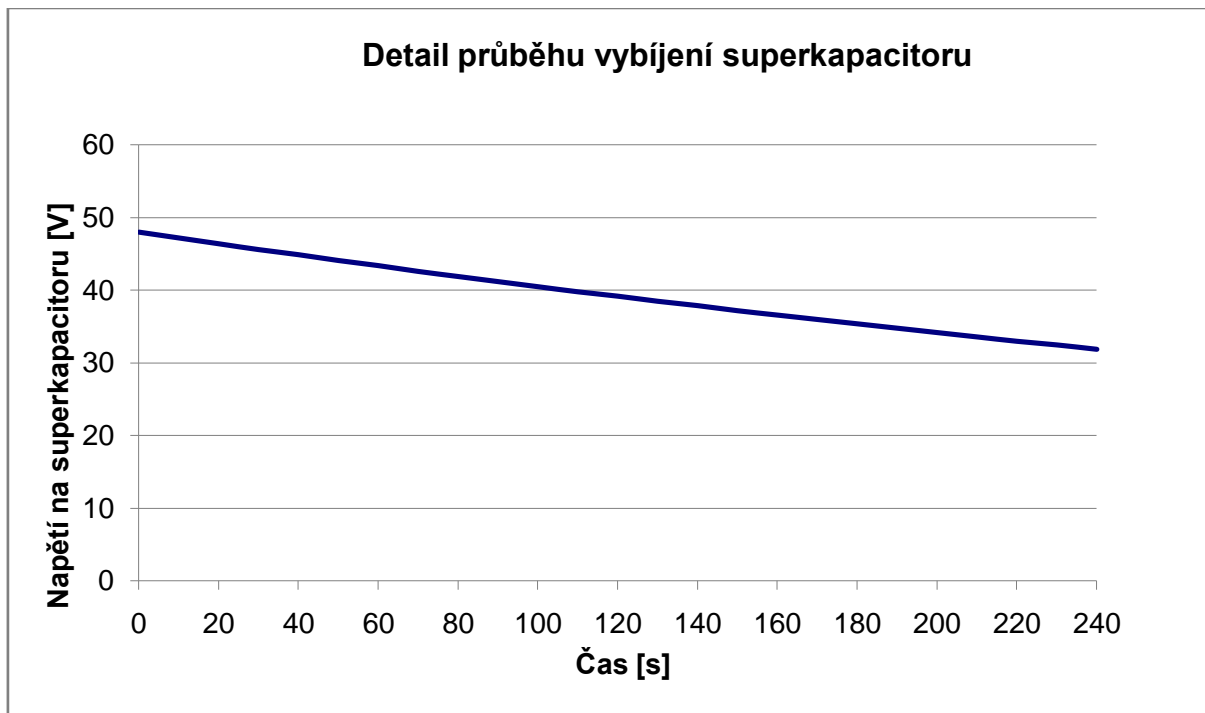


Graf 2 Nabíjení superkapacitoru



Graf 3 Vybíjení superkapacitoru

Při plném vybíjení superkapacitoru je potřeba sledovat čas, za který dojde k poklesu napětí na hodnotu nedostatečnou pro pohon elektromotoru. Plným vybíjením se rozumí jízda do prudkého kopce s minimální asistencí cyklisty. V navrhovaném případě se jedná o 36,6V, což je hodnota pracovního napětí motoru. Při poklesu pod tuto mez by pak motor přestal fungovat a byl by naopak přítěží. Z *Grafu 4* pak plyne, že tato situace nastane po 240 sekundách.



Graf 4 Doba poklesu napětí pod kritickou mez

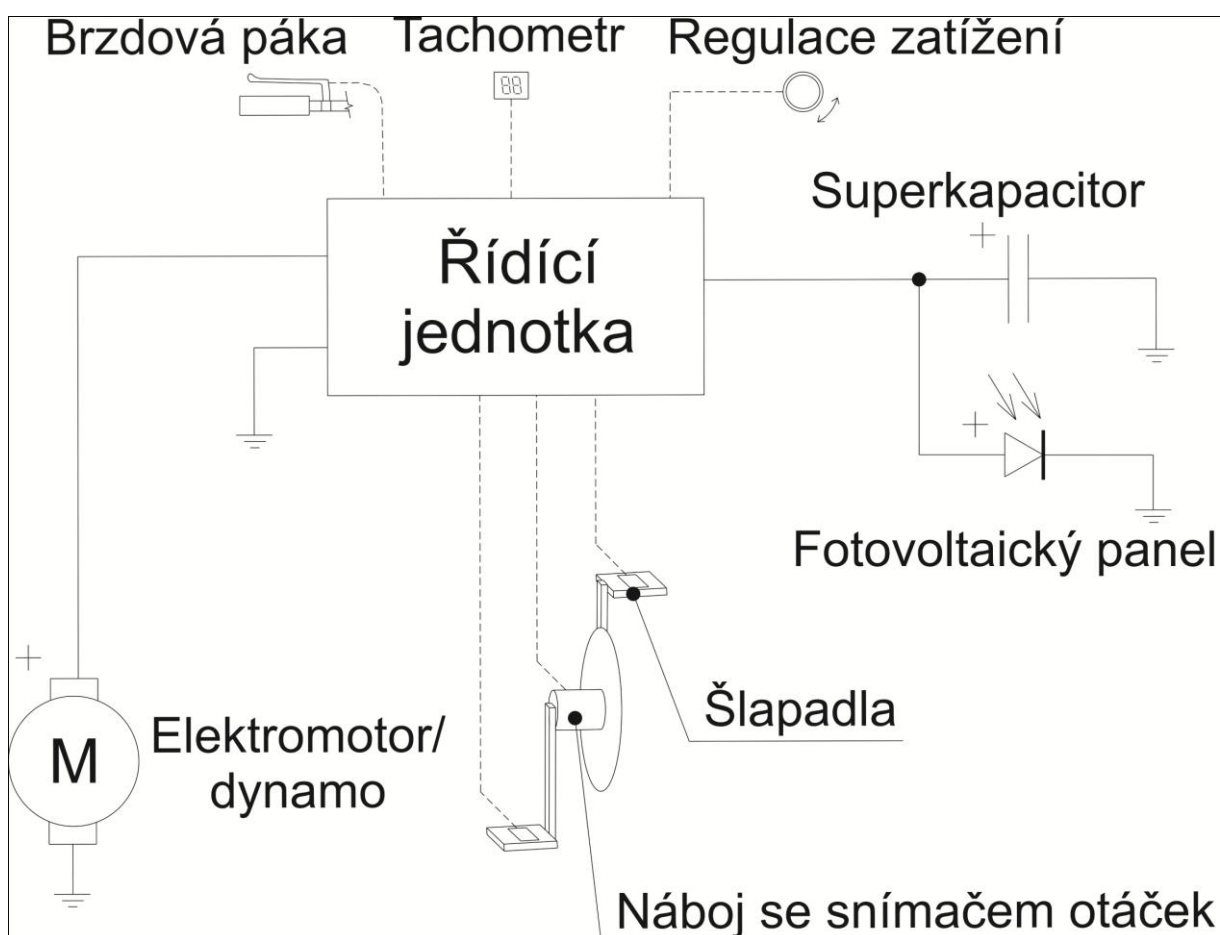
U návrhu kondičního kola je však předpoklad, že cyklista se bude celou dobu jízdy aktivně zapojovat a bude plnit roli primárního pohonu, elektromotor bude sloužit pouze jako pohon pomocný. Proto je předpoklad, že vybíjení superkapacitoru bude trvat mnohem déle a v ideálním případě napětí nikdy neklesne pod minimální mez. Pokud by však přece jen nastala situace, kdy by cyklista vyrazil do horské oblasti s vysokým převýšením, pak navrhuji na bicykl umístit ještě solární panel, který dodá potřebný výkon k pokrytí vyššího energetického výdeje. Je schopen dodávat výkon 6,5W při napětí 24V.



Obr. 28 Solární panel [9]

4.1.5 SCHÉMA ZAPOJENÍ

Ke komplexnímu návrhu soustavy slouží následující schéma, které zajišťuje funkční chod a dostatek efektivity pro kondiční cvičení. Návrhem má být zajištěno, aby si cyklista mohl zvolit zátěž, s jakou pojede, respektive jakým množstvím energie přispěje k pohonu a jaké množství se uloží do superkapacitoru pro pozdější pomoc při jízdě do kopce.



Obr. 29 Schéma zapojení

Řídicí jednotka musí pro správné fungování zpracovat signály hned z několika snímačů.

- **Snímač otáček** – snímač otáček osy klik šlapadel. Pokud dojde k zastavení šlapání, pak řídicí jednotka neobdrží žádný signál a odpojí elektromotor/dynamo tak, aby kolo jelo pouze vlastní setrvačností.
- **Potenciometr v brzdové páce** – brzdová páka je vybavena potenciometrem s dorazem. Měří intenzitu zmáčknutí páky a při dosažení dorazu se pak dostává do záběru lanko, které tvoří mechanickou vazbu s brzdíčem. V ten okamžik vyvine maximální brzdový moment motor a současně dochází ke tření mezi brzdíčem a ráfkem kola. Tím je zajištěna bezpečnost zastavení. Z potenciometru pak jde do řídicí jednotky signál, který udává, jakou intenzitou má bicykl zpomalovat, potažmo jak velký odpor má klást dynamo. Jak již bylo zmíněno, ideálním případem je situace, kdy cyklista nebude muset brzdit a tento úkon za něj bude obstarávat řídicí jednotka.

Ovšem v běžné praxi nastávají situace, kdy je potřeba využít i brzdy mechanické a celkově to vyžaduje bezpečnost silničního provozu.

- **Regulátor zatížení** – cyklista si pomocí regulátoru zatížení zvolí obtížnost šlapání a tím i intenzitu kondičního cvičení. Řídící jednotka pak podle toho vyhodnotí, kolik dodávat energie cyklistovi pomocí elektromotoru a kolik do systému přinese on. Taktéž se pomocí regulátoru nastaví, jakou požadovanou rychlostí chce cyklista jet.
- **Tlakové snímače** – snímače tlaku na šlapadlech dávají řídící jednotce signál, podle kterého vyhodnocuje, jakou silou cyklista působí na pedály a hlídá, aby byla tato síla co možná nejkonstantnější dle zvoleného zatížení pomocí regulátoru zatížení. Jelikož cyklista nevyvíjí na snímač konstantní tlak, ale signál je sinusový, pak je třeba pro správnou funkci brát pouze část signálu a to tu maximální.
- **Tachometr** – informuje cyklistu o aktuální rychlosti, ujeté vzdálenosti, spálených kaloriích a podobně. Taktéž může zobrazovat aktuální poměr energie a směr jejího toku, zda cyklista jede vlastní silou, pomáhá mu motor, nebo dobíjí. Taktéž tachometr dává informaci řídící jednotce o rychlosti, kterážto ji pak reguluje na požadovanou hodnotu.
- **Fotovoltaický panel** – slouží ke krytí energetického nedostatku v obtížném terénu.
- **Řídící jednotka** – zpracovává signály z výše uvedených snímačů. Jejím úkolem je rozdělovat energetické vstupy (cyklista, dynamo, fotovoltaický panel) a výstupy (elektromotor) tak, aby byla zajištěna zvolená konstantní rychlost a hlavně zátěž pro cyklistu. Jedině tak může plnit celý systém funkci kola pro kondiční cvičení.

Představa funkce je pak taková, že cyklista si před jízdou zvolí jízdní režim, podle kterého pojede, bude cvičit. To znamená watt, který chce sám do systému odevzdávat a rychlost, kterou pojede. Pak již během jízdy bude tato regulace automaticky prováděna řídící jednotkou tak, že cyklista bude šlapat se stále stejným zatížením a frekvencí s konstantní rychlostí bez ohledu na to, zda jede z kopce, po rovině, či do kopce.

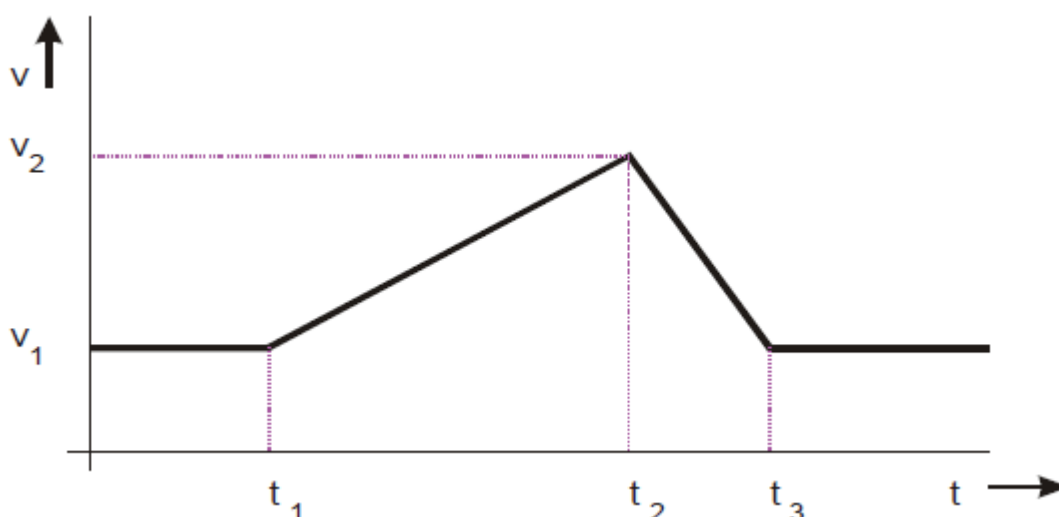
Jednodušší formou lze pak regulaci celého systému provádět cyklistou samotným. Odpadne tak potřeba většiny snímačů, zůstane pouze snímač v brzdové páce a přibude páčka pro spouštění elektromotoru. Celý systém pak řídí cyklista na základě vlastního pocitu z námahy. Toto řešení je jednodušší a konstrukčně méně náročné, avšak zaměstnává ve větší míře pozornost cyklisty.

5 SIMULACE JÍZDNÍHO MANÉVRU

Pro simulaci využití a kontrolu navrhovaného superkapacitoru je uveden příklad jízdního manévru. Pro jednoduchost je uváděn jako předjížděcí manévr, kdy je vyžadováno náhlé zvýšení rychlosti a pak decelerací na rychlost původní, ale dá se též aplikovat jako jízda do kopce a z kopce. Jedná se pouze o teoretický výpočet za ideálního stavu, kdy nejsou uvažovány jízdní odpory, ztráty ve vedení a spotřeba jednotlivých snímačů a komponent.

5.1 MODEL JÍZDNÍHO MANÉVRU

Jízdní manévr je vyjádřen ve v - t diagramu, kdy jezdec zrychluje v čase $t_1 - t_2$ konstantě z v_1 na v_2 , což nahrazuje výjezd do kopce. V intervalu z t_2 do t_3 pak zpomaluje zpět z rychlosti v_2 na rychlost v_1 . Toto lze brát jako okamžik, kdy cyklista vyjede na kopec a pokračuje dále po rovině. Vše probíhá za konstantního záběru cyklisty, pro překonání zvýšeného energetického výdeje mu pomáhá elektromotor. Pro zjednodušení je zanedbán aerodynamický odpor.



Obr. 30 v - t diagram jízdního manévru [6]

Celková dráha s ujetá cyklistou je pak vyjádřena vztahem:

$$s = \int_{t_1}^{t_3} v \, dt \quad (5.1)$$

V intervalu $\Delta t_1 = t_2 - t_1$ cyklista zrychluje, respektive jede do kopce, s akcelerací a_1 po dráze s_1 , posléze pak zpomaluje, vyjede na rovinu, v intervalu $\Delta t_2 = t_3 - t_2$ s decelerací a_2 po dráze s_2 .

Velikost konstantního zrychlení a zpomalení lze pak vyjádřit vztahy:

$$a_1 = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \quad (5.2)$$

$$a_2 = \frac{v_1 - v_2}{t_3 - t_2} \quad (5.3)$$

Dráha ujetá cyklistou v obou případech je pak vyjádřena vztahy:

$$s_1 = \frac{1}{2} a_1 \cdot \Delta t_1^2 \quad (5.4)$$

$$s_2 = \frac{1}{2} a_2 \cdot \Delta t_2^2 \quad (5.5)$$

Síly potřebné k akceleraci a deceleraci jsou vyjádřeny vztahy:

$$F_a = m \cdot a_1 \quad (5.6)$$

$$F_d = m \cdot a_2 \quad (5.7)$$

Energie potřebná k vykonání tohoto jízdního manévru je pak vyjádřena vztahy:

$$W_a = F_a \cdot s_1 \quad (5.8)$$

$$W_d = F_d \cdot s_2 \quad (5.9)$$

Celková energie uložená v superkapacitoru je vyjádřena vztahem:

$$W_{sc} = \tau \cdot C \cdot U^2 \quad (5.10)$$

Vzhledem k tomu, že nelze superkapacitor zcela vybit, lze za únosnou mez počítat vybití na 50% jmenovitého napětí, kdy má ještě dostatek energie pro pohon elektromotoru. Pokud bude mít počáteční napětí hodnotu U_2 , pak polovina této hodnoty bude vyjádřena jako $U_2/2$. Touto podmínkou je pak dána energie vztahem:

$$W_{sc} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \left(U_2^2 - \left(\frac{U_2}{2} \right)^2 \right) = \frac{3}{8} \cdot C \cdot U_2^2 \quad (5.11)$$

Minimální potřebná kapacita k provedení tohoto manévru je vyjádřena vztahem:

$$C = \frac{8W_{sc}}{3U_2^2} \quad (5.12)$$

Střední hodnota výkonu nutného pro akceleraci je dána vztahem:

$$P_a = \frac{W_a}{\Delta t_1} \quad (5.13)$$

Vzhledem k určité míře ztrát, které jsou způsobeny přenosem energie mezi motorem a superkapacitorem, účinností motoru a obvodu, je potřeba navýšit energetickou rezervu. Instalovaná kapacita se pak řídí vztahem:

$$C_{in} = 2C = \frac{16W_{sc}}{3U_2^2} \quad (5.14)$$

5.1.1 NUMERICKÝ VÝPOČET

Pro výpočet stanovme podmínky, za kterých se jízdní manévr uskuteční. Hmotnost jezdce je brána jako průměrná, hmotnost kola pak jako hmotnost běžného kola společně se superkapacitorem, motorem a řídicí jednotkou.

- Hmotnost jezdce s kolem $m = 80 + (12,45 + 11 + 4 + 2) = 109,45$ [kg]
- Počáteční rychlost $v_1 = 5$ [m/s] v čase $t_1 = 0$ [s]
- Doba akcelerace na čas $t_2 = 60$ [s]
- Dosažená rychlost $v_2 = 9$ [m/s]
- V intervalu $\Delta t_2 = 25$ [s] dojde ke snížení rychlosti zpět z v_2 na v_1

Dle (5.2) a (5.3) vypočteme zrychlení pro jednotlivé úseky:

$$a_1 = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{4}{60} = 0,0666667 \text{ [m/s}^{-1}\text{]}$$

$$a_2 = \frac{v_1 - v_2}{t_3 - t_2} = \frac{-4}{25} = -0,16 \text{ [m/s}^{-1}\text{]}$$

Vzdálenost s_1 a s_2 ujeté v intervalu Δt_1 a Δt_2 určíme dle (5.4) a (5.5)

$$s_1 = \frac{1}{2} a_1 \cdot \Delta t_1^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,0666667 \cdot 60^2 = 120 \text{ [m]}$$

$$s_2 = \frac{1}{2} a_2 \cdot \Delta t_2^2 = \frac{1}{2} \cdot (-0,16) \cdot 25^2 = 50 \text{ [m]}$$

Ze vztahů (5.6), (5.7), (5.8) a (5.9) určíme síly a energie pro zrychlení a zpomalení

$$F_a = m \cdot a_1 = 109,45 \cdot 0,0666667 = 7,296 \text{ [N]}$$

$$F_d = m \cdot a_2 = 109,45 \cdot (-0,16) = -17,512 \text{ [N]}$$

$$W_a = F_a \cdot s_1 = 7,296 \cdot 120 = 875,52 \text{ [J]}$$

$$W_d = F_d \cdot s_2 = (-17,512) \cdot 50 = 875,5 \text{ [J]}$$

Pro jistotu zvládnutí počítaného jízdního manévru pak bude potřebná kapacita navýšena o 30% k pokrytí aerodynamických ztrát a tření. Potřebná kapacita pro vykonání jízdního manévru vychází dle (5.14) při uvažování počáteční napětí $U_2 =$

$$C_{in} = 2C = \frac{16W_{sc}}{3U_2^2} = \frac{16 \cdot 1137,5}{3 \cdot 36,49^2} = 4,5 \text{ [F]}$$

Z výsledku vyplývá, že celková navrhovaná kapacita 86F superkapacitoru plně vystačí pro tento jízdní manévr. Dále lze předpokládat, že plně vystačí i pro účely kondičního bicyklu.

6 VIZUALIZACE MOŽNÉHO ŘEŠENÍ

Tato kapitola obsahuje vizualizační návrhy rekuperační soustavy. Jedná se pouze o jedno z mnoha řešení, protože kompletní soustava může být nainstalována na libovolné pozemní HPV.



Obr. 31 Celkový pohled

Na *Obr. 31* je patrné umístění superkapacitoru na nosiči, řídící jednotka v prostoru pod sedlem a elektromotor/dynamo v náboji předního kola.



Obr. 32 Detail umístění superkapacitoru a řídicí jednotky



Obr. 33 Pohled shora

Na Obr. 3 je patrné, že lze na superkapacitor umístit fotovoltaický panel.



Obr. 34 Detail umístění tlakových snímačů



Obr. 35 Detail brzdy a elektromotoru/dynama

ZÁVĚR

Cílem práce byl ideový návrh rekuperace energie mařené při brzdění silničního vozidla poháněného lidskou silou. Systémů se nabízelo hned několik, ovšem s ohledem na parametry vozidla, pro které má být tato soustava určena a po zevrubném studiu dalších možností popsanych v kapitole 3, byla vybrána soustava, kde k akumulaci energie slouží superkapacitor a k pohonu pak elektromotor, který rovněž plní úlohu dynama. Tato soustava je snadno regulovatelná a po aplikaci vhodného řídicího programu může fungovat zcela automatizovaně, bez zásahu jezdce. Orientační výpočty dokládají, že celá soustava společně s návrhem řídicího obvodu tvoří celek, který má dostatečnou kapacitu k reálnému provozu.

Soustava má dostatek kapacity k tomu, aby fungovala pouze jako rekuperační, ta ale žádným způsobem nenapomáhá ke zlepšování fyzické kondice jezdce. Proto došlo k návrhu takové soustavy, která cyklistovi bude nejen pomáhat, ale také ho při jízdě z kopce a po rovině zatěžovat konstantně tak, jako by byl v tělocvičně na stacionárním rotopedu.

Grafický návrh aplikuje soustavu na nejběžnější typ HPV a to sice na jízdní kolo, ovšem instalaci lze provést na jakýkoliv typ silničního vozidla poháněného lidskou silou, jako jsou například lehokola.

K návrhu řídicí jednotky a řídicího algoritmu je však třeba hlubších znalostí z oblasti elektrotechniky a programování, proto svou práci nabízím k dalšímu studiu a rozvoji navrhnutého systému.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ABBOTT, A., WILSON, D. Human-Powered Vehicles. První vydání, 1995. ISBN 0-87322-827-8
- [2] VLK, F. Teorie a konstrukce motocyklů 1. První vydání, Brno, 2004. ISBN 80-239-1601-7
- [3] VLK, F. Automobily 1. Druhé vydání, Brno, 2001. ISBN 80-239-8757-2
- [4] VLK, F. Dynamika motorových vozidel. Druhé vydání, Brno, 2003. ISBN 80-239-0024-2
- [5] VLK, F. Podvozky motorových vozidel. Druhé vydání, Brno, 2001. ISBN 80-239-0026-9
- [6] MINDL, P. Superkapacitor pro hybridní pohon vozidla. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap5_Plzen.pdf>
- [7] RAUSCHER, J. Vozidlové motory [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.iae.fme.vutbr.cz>>
- [8] ECOM s. r. o. [online]. Poslední revize 20.5.2011 [cit. 2011-20-5]. Dostupné z <<http://www.ecom.cz/files/documents-catalogue/47.pdf>>
- [9] AUTO.IDNES.CZ. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <http://auto.idnes.cz/setrvacniky-kers-uz-miri-z-formule-1-do-obycejnych-aut-pf3-/automoto.aspx?c=A090423_153801_automoto_vok>
- [10] UNI-MAX.CZ. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.uni-max.cz/stlacen-y-vzduch/>>
- [11] COLLECTION OF SOLID PROBLEMS IN PHYSICS [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.physicstasks.eu/>>
- [12] RECUMBENTS.COM. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.recumbents.com/home/>>
- [13] EMDŽEJOVA paměť. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://mj41.cz/wiki/Superkapacitor>>
- [14] HYPERPHYSIC. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/capchg.html>>
- [15] TZB-Technické Zabezpečení Budov. [online]. Poslední revize 20.5.2011 Dostupné z <<http://energie.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>>
- [16] NEDŘISE. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://nedrise.cz/14-prestavba-elektrokol>>

- [17] CITYBIKES.CZ. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <http://www.citybikes.cz/eshop/elektrifikace-kol/citybikes-electrokit-ii-predni-nahon.html>>
- [18] HYBRID.CZ. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <http://www.hybrid.cz/v-nizozemsku-stavi-cyklostezku-ktera-vyrabi-energii>>
- [19] ČEZ. a.s. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html>
- [20] NÁRODNÍ STRATEGIE CYKLISTICKÉ DOPRAVY. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <http://www.cyklostrategie.cz/>>
- [21] VELOCIPEDY TELČ. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <http://www.velocipedy-telc.cz>>
- [22] GRUBER, J. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/clanky/vyn_kola.pdf>
- [23] ELEKTROMOBILY.ORG. Hybridní technologie. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z http://www.elektromobily.org/wiki/Soubor:Hybrid_Hitachi.JPG>
- [24] AUTOMATIZACE.HW.CZ. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <http://automatizace.hw.cz/el-pohony/ART299-superkondenzator--princip-vlastnosti-pouziti.html>>
- [25] ČD. Superkapacity v dopravní technice. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <http://www.cdmail.cz/VTS/CLANKY/vts25/2511.pdf>>
- [26] KOMPRESOR.CZ. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <http://www.kompresor.cz/?inc=shop&id=112&menu=compressors&link=pistons>>
- [27] ECOTECH. Elektropohony do kola. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <http://www.ecotech.cz/elektrokola-motory/>>
- [28] TOROTRAK. Kers CVT. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z http://www.torotrak.com/pdfs/literature/KERS_CVT_brochure.pdf>
- [29] KOMPRESORY JIROUT. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <http://www.jiroutkompresory.cz/kompresor-compact-master-cpm-160-8-2-w-bezolej>>
- [30] ZAPLETAL, M. Nabíjení kondenzátoru. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z www.souch.cz/dok/nabijeni_kapacitoru.ppt>
- [31] K&F TECHNICKÁ GUMA. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z http://www.guma.cz/shd-letecka_guma.htm>

- [32] ENDELES SPHERE TECHNOLOGY. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.endless-sphere.com/>>
- [33] CELERIFERE. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://hubpages.com/hub/celerifere-first-bicycle>>
- [34] KOLA ŠTĚRBA. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.sterba-kola.cz/>>
- [35] OHIO.EDU. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.ohio.edu/mechanical/programming/hpv/hpv.html>>
- [36] RM AUCTIONS. Boneshaker. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.rmauctions.com/auction-results-overview.cfm?SaleCode=AM11#>>
- [37] ROWEROWYTORUN. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <http://rowerowytorun.com.pl/index.php?akcja=art_drukuj&art_id=133>
- [38] GNOSIS9. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://hledani.gnosis9.net/view.php?cislocianku=2008120007>>
- [39] RUBICON PROJECT. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.rubiconproject.com/blog/culture/?p=877>>
- [40] CARBON FIBER GEAR. Full carbon fiber wheel. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.carbonfiberglass.com/weds-sport-full-carbon-fiber-wheel/>>
- [41] LAURINI. Runbike. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.runbiking.eu/Runbiking/Co-je-to-runbiking>>
- [42]

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

w	[Wh.kg ⁻¹]	hustota energie
μ	[%]	účinnost
a	[m.s ⁻²]	zrychlení
C	[F]	kapacita superkapacitoru
E_k	[J]	kinetická energie
E_{\max}	[Wh.kg ⁻¹]	hustota uložené energie v superkapacitoru
f	[s ⁻¹]	frekvence
F	[N]	síla
I	[A]	proud
I_c	[mA]	ztrátový vnitřní proud změřený 72 hodin po nabití superkapacitoru na U_n
I_{cc}	[A]	maximální kontinuální proud superkapacitoru
I_n	[A]	jmenovitý proud, vybíjení po dobu 5s na $U/2$ superkapacitoru
I_p	[A]	špičkový proud superkapacitoru po dobu 1s
I_{sc}	[A]	zkratový proud superkapacitoru
J	[kg.m ²]	moment setrvačnosti
L, W, S	[mm]	rozměry superkapacitoru
m	[kg]	hmotnost
M_k	[N.m ⁻¹]	krouticí moment motoru
P	[kW.kg ⁻¹]	špičkový výkon dodaný do zátěže superkapacitorem
P_a	[W]	střední hodnota výkonu
P_m	[kW.kg ⁻¹]	měrný výkon
P_p	[W _p]	příkon motoru
P_v	[W _p]	výstupní výkon motoru
Q	[C]	elektrický náboj
R	[Ω]	elektrický odpor
R_d	[mΩ]	vnitřní odpor superkapacitoru při 100Hz
R_{esr}	[mΩ]	počáteční stejnosměrný vnitřní odpor superkapacitoru
R_m	[Ω]	vnitřní odpor motoru
R_v	[Ω]	vnitřní odpor zdroje
s	[m]	dráha
t	[s]	čas

T	[°C]	teplota
U	[V]	napětí
U _n	[V]	jmenovité napětí superkapacitoru
U _r	[V]	vnitřní odpor rezistoru
v	[m.s ⁻¹]	rychlost
W	[J]	energie
Δ t	[s]	časová změna
τ	[-]	časová konstanta
ω	[s ⁻¹]	úhlová rychlost



Seznam příloh

Příloha 1: CD